



UN HUMAIN VIRTUEL ANIME PAR DES TECHNIQUES ROBOTIQUES BIO-INSPIREES POUR L'EVALUATION ERGONOMIQUE EN CONCEPTION DE POSTES DE TRAVAIL

Jonathan Savin, Clarisse Gaudez, Giovanni de Magistris

► To cite this version:

Jonathan Savin, Clarisse Gaudez, Giovanni de Magistris. UN HUMAIN VIRTUEL ANIME PAR DES TECHNIQUES ROBOTIQUES BIO-INSPIREES POUR L'EVALUATION ERGONOMIQUE EN CONCEPTION DE POSTES DE TRAVAIL . MOSIM 2014, 10ème Conférence Francophone de Modélisation, Optimisation et Simulation, Nov 2014, Nancy, France. hal-01166682

HAL Id: hal-01166682

<https://hal.science/hal-01166682>

Submitted on 23 Jun 2015

HAL is a multi-disciplinary open access archive for the deposit and dissemination of scientific research documents, whether they are published or not. The documents may come from teaching and research institutions in France or abroad, or from public or private research centers.

L'archive ouverte pluridisciplinaire **HAL**, est destinée au dépôt et à la diffusion de documents scientifiques de niveau recherche, publiés ou non, émanant des établissements d'enseignement et de recherche français ou étrangers, des laboratoires publics ou privés.

Un humain virtuel animé par des techniques robotiques bio-inspirées pour l'évaluation ergonomique en conception de postes de travail

Jonathan SAVIN, Clarisse GAUDEZ

Giovanni DE MAGISTRIS

Institut national de recherche et de sécurité

1 rue du Morvan

CS 60027

54519 Vandoeuvre cedex - France

jonathan.savin@inrs.fr, clarisse.gaudez@inrs.fr

CEA SACLAY - DIGITEO MOULON

DRT/LIST/DIASI/LSI

Point courrier n°178

91191 Gif s/ Yvette cedex - France

giovanni_demagistris@hotmail.it

RÉSUMÉ : *Les humains virtuels sont des outils informatiques utilisés en conception d'équipements de travail pour simuler l'activité future des opérateurs et en faire l'évaluation ergonomique. Ils présentent donc un réel intérêt pour l'intégration de la prévention dès les premières phases de conception. Cependant, leur mise en œuvre est complexe et peut, dans certains cas, conduire à une sous-estimation des contraintes subies par le futur opérateur. Cet article présente le développement de modèles et d'algorithmes de commande dynamiques inspirés du comportement humain, en particulier des capacités d'anticipation, de rétroaction et d'apprentissage. Ils permettent d'animer un humain virtuel de manière automatique et aussi réaliste que possible, en vue d'une évaluation ergonomique fiable. Ces développements ont été validés à l'aide de données biomécaniques issues de situations expérimentales. Ces travaux seront complétés pour améliorer encore ces humains virtuels afin de permettre la prise en compte, dès les premières phases de conception d'une situation de travail, de la variabilité des mouvements des futurs opérateurs.*

MOTS-CLÉS : *conception, humains virtuels, évaluation ergonomique, lois de commande, contrôle dynamique*

1 INTRODUCTION

Au cours des vingt dernières années, les processus de conception ont profondément évolué afin de mieux prendre en compte les contraintes industrielles nouvelles : raccourcissement du cycle de vie des produits, évolutions rapides des marchés, attente des clients de produits plus personnalisés... Dans ce contexte, grâce aux progrès des technologies informatiques, les outils logiciels de simulation pour la conception et la planification de produits et process industriels se sont progressivement imposés dans l'industrie manufacturière (Claudon et al. 2008), donnant naissance au concept de "l'usine numérique" (Arndt 2006). Parmi ces outils, les humains virtuels (HV), également appelés mannequins numériques, ont connu un développement notable. Ils permettent aux concepteurs, bureaux d'études et cabinets de conseil de représenter et de mettre en situation des opérateurs virtuels (Haesen 2009, Urbatic Concept 2007) afin d'évaluer les contraintes futures d'une situation de travail (anthropométrie, zones d'atteinte, performances physiques, analyse de temps). Grâce à eux, un concepteur de poste de travail peut définir et

évaluer les mouvements du futur opérateur. Avant même la réalisation de prototypes physiques du futur poste de travail, les HV peuvent donc contribuer à l'application des principes de sécurité dès la conception édictés par la Directive Machines 2006/42/CE (European Parliament and Council 2006) et les normes associées (CEN 2005, CEN 2007). Ils peuvent également être utilisés comme support de communication entre les différents acteurs du projet tels que les concepteurs, les préventeurs, les utilisateurs et les décideurs. Ainsi, les mannequins numériques peuvent favoriser une conception ergonomique des postes de travail (Falck & Rosenqvist 2012). Les principaux éditeurs de logiciels de conception industrielle ont ainsi intégré dans leur gamme des solutions permettant de simuler l'activité d'un opérateur, par exemple les logiciels Human dans la gamme Delmia de Dassault Systèmes, ou Jack pour Tecnomatix de Siemens.

Pour obtenir une évaluation ergonomique la plus fiable possible de la future situation de travail, plusieurs informations doivent être connues : les postures de l'opérateur (angles articulaires), les efforts

musculaires, couples articulaires et/ou les forces exercés par l'opérateur ainsi que le temps de cycle de la tâche. L'utilisation des HV pour calculer ces données dès les premières phases de conception présente certaines limites. Premièrement, la mise en postures animées des HV est généralement longue et complexe. En effet, la prise en compte de l'ensemble des mouvements, et pas seulement d'un échantillon restreint de postures, conduit à une évaluation ergonomique plus robuste d'une situation de travail (Andreoni et al. 2011). Or un niveau de réalisme satisfaisant nécessite un temps d'animation très conséquent pour le concepteur : certains utilisateurs évoquent un rapport de 300 entre la durée d'animation et la durée de l'activité simulée. En outre, l'animation réaliste d'HV nécessite de solides compétences en biomécanique et en physiologie. Deuxièmement, l'évaluation des efforts simulés à l'aide d'HV est parfois approximative. Or le niveau d'effort est, avec les postures et le temps d'exécution de la tâche, l'un des principaux paramètres de calcul des indices d'évaluation ergonomiques usuels : RULA (MacAtamney & Cortlett 1993), OCRA (Occhipinti 1998), EAWS (Schaub et al. 2013), etc. Les sources d'erreurs sont nombreuses : on peut citer par exemple les approximations liées aux modèles cinématiques (nombre d'articulations considérées, couplages articulaires) et mécaniques (non prise en compte de la dynamique ni des efforts de maintien de posture) mis en œuvre pour simuler l'activité future. Des études comparatives ont montré que, dans certaines situations, les contraintes subies par l'opérateur sont sous-estimées (Savin 2011, Lämkuhl et al. 2009).

L'animation *automatique et inspirée du comportement humain* des HV est l'une des priorités identifiées pour l'application de ces outils en conception de postes de travail (Zülch 2012). Fournir aux concepteurs d'équipements de travail (outil, poste de travail, ligne d'assemblage) des systèmes leur permettant de simuler l'activité future de manière réaliste, tout en leur imposant un surcroît de travail minimal par rapport à leurs pratiques actuelles, constitue donc un véritable défi. Cet article présente les travaux de recherche menés en collaboration par l'Institut national de recherche et de sécurité (INRS) et le Commissariat à l'Énergie Atomique et aux énergies alternatives (CEA) en vue du développement et de la validation d'algorithmes de commande pour l'animation réaliste et automatique d'HV. Ils ont fait l'objet d'une thèse de doctorat (De Magistris 2014).

La première partie de cet article présente l'environnement logiciel de simulation utilisé. La deuxième partie décrit le modèle d'HV et les lois de commande inspirées du comportement humain mises en œuvre. La troisième partie présente la validation expérimentale des travaux et les résultats obtenus.

2 ENVIRONNEMENT DE SIMULATION ET ANIMATION DES HUMAINS VIRTUELS

2.1 Méthode d'animation

Il existe plusieurs méthodes d'animation (semi-) automatique d'HV. On peut citer par exemple les approches basées sur l'exploitation de données de mouvement réelles, issues de la capture des mouvements d'un opérateur humain sur un poste de travail instrumenté ou virtuel (Fritzsche et al. 2011). Ces séquences de mouvement sont indexées dans une base de données et transformées pour être appliquées à des situations similaires : on "déforme" alors un mouvement sélectionné pour l'adapter à la nouvelle situation envisagée (sujet d'anthropométrie différente, nouvelle géométrie de l'environnement, etc.). On parle alors de simulation basée sur des données (*data-based*). L'avantage de cette technique est qu'elle repose sur des séquences réelles de mouvement humain, mais elle nécessite des bases de données très conséquentes, qui doivent en outre être enrichies pour chaque nouveau type d'activité. Par ailleurs, le mouvement adapté ne suit plus forcément les lois de la physique, par exemple lorsque le poids des objets manipulés au cours du mouvement simulé ne correspond pas au poids des objets manipulés au cours du mouvement réel. On peut également citer l'animation (semi-) automatique à partir de modèles mécaniques pilotés par des lois de contrôle adaptées des techniques robotiques (Colette 2009, Salini 2012, Mansour 2013). On parle alors de simulation basée sur des modèles (*model-based*). Les mouvements de l'HV vérifient donc toujours les lois de la physique, mais ils ne suivent pas exactement des mouvements humains. Le réalisme de la simulation dépend donc de la finesse des lois de contrôles rendant compte du comportement humain.

Ces deux approches nécessitent un travail de paramétrisation des simulations conséquent, soit par le choix des mouvements de référence, soit par le choix des paramètres des lois de contrôle. Pour les travaux présentés dans cet article, c'est la deuxième approche qui a été suivie car elle respecte les lois de la physique classique, et permet donc de prendre en compte la dynamique du mouvement (accélération, forces, équilibre) et pas seulement sa cinétique.

2.2 Environnement logiciel

Pour développer le contrôle d'un HV ayant un comportement réaliste tant du point de vue du mouvement global (postures, trajectoires) que du point de vue des données quantifiées qui le définissent (positions, vitesses, accélérations, efforts, etc.), nous avons utilisé l'environnement XDE¹ (eXtended Dynamic

¹ <http://www.kalisteo.fr/lsi/aucune/a-propos-de-xde>

Engine) développé par le CEA-LIST. Il est conçu pour gérer des systèmes multi-corps, rigides ou déformables, multi-contacts. Son formalisme mécanique est basé sur les groupes de Lie (Merlhiot 2009). Les algorithmes de résolution numérique, orientés interactivité et temps-réel, sont très rapides. Le moteur de simulation gère l'ensemble des mouvements de l'HV dans son environnement d'après la simulation physique du monde réel (mécanique newtonienne, forces de frottement de Coulomb). Il inclut le contrôle automatique des forces et couples appliqués, la résolution de collisions et les contraintes de contact. Au niveau logiciel, XDE nécessite simplement un ordinateur pouvant exécuter le langage Python (version 2.7).

2.3 Simulation de l'activité au poste de travail

La simulation de l'activité au futur poste de travail nécessite différents éléments :

- la description de l'activité future. Notre simulateur exploite une "machine à états" qui exécute, de manière séquentielle et/ou parallèle, les actions élémentaires constituant cette activité. Ces actions élémentaires (atteindre, saisir, déplacer, exercer un effort) correspondent à celles définies par différentes méthodes de conception ou d'évaluation ergonomique (cf. par exemple la méthode MTM (Maynard et al. 1948) ou l'indice OCRA (Occhipinti 1998)) ;
- la description de l'environnement. Il s'agit ici de préciser la géométrie du poste (y compris les obstacles ou objets à éviter), la taille et la masse des pièces et outils manipulés, etc. ;
- la description de l'opérateur (anthropométrie).

Tous ces éléments sont à déterminer par le concepteur de l'équipement de travail, indépendamment de toute simulation.

3 MODÉLISATION DE L'HUMAIN VIRTUEL ET DES LOIS DE COMMANDE

3.1 Modélisation mécanique de l'humain virtuel

Le corps humain a été modélisé comme un ensemble de corps rigides articulés (voir figure 1) organisés en structure arborescente caractérisée par ses degrés de liberté (DDL). Chaque articulation a été modélisée par un certain nombre de liaisons pivots, selon les DDL des segments humains correspondants. Notre HV comprend 39 DDL articulaires (8 DDL pour chaque membre inférieur, 7 DDL pour

chaque membre supérieur, 9 pour le tronc et la tête) et 6 DDL pour le segment racine (ce dernier n'est pas contrôlé). L'anthropométrie des HV est paramétrable (longueur, masse et inertie des segments). Pour les différentes simulations réalisées, elle a été ajustée, selon l'anthropométrie de chaque sujet, d'après le modèle de Hanavan (Hanavan 1964). Le contrôle automatique de la préhension et de la main n'a pas été intégré à nos travaux. Un contrôleur proportionnel-dérivé dédié a été utilisé pour ajuster la position courante de la main d'après des configurations prédéterminées (prise en pince, palmaire, de force, main ouverte, etc.). Le modèle de la main, illustré à la figure 1, possède 20 DDL.



Figure 1: L'humain virtuel : habillage et géométrie de collision (à gauche). Modèle de main : habillage et géométrie de collision (à droite)

3.2 Développement du contrôleur d'humain virtuel dynamique multi-objectif bio-inspiré

Des travaux menés dans le domaine du contrôle moteur humain ont introduit les notions d'anticipation et de rétroaction. D'une part, le système nerveux central (SNC) prédit le mouvement à réaliser (Hugon et al. 1982) grâce à un modèle interne dynamique de l'appareil locomoteur (Kawato 1999, Imamizu et al. 2000), ainsi que l'existence de critères d'optimisation pour l'élaboration du mouvement prédit. D'autre part, le SNC adapterait en continu le mouvement réel, connu à partir des informations proprioceptives et extéroceptives, d'après le mouvement prédit. Ce contrôle en rétro-action permet la mise en place d'ajustements (Berthoz 1997) et une adaptation à des perturbations (Conditt et al. 1997, Bizzi & Mussa-Ivaldi 1998, Gribble & Ostry 2000). Notre contrôleur cherche à tenir compte de ces deux caractéristiques.

3.2.1 Planification du mouvement

Le premier niveau de contrôle de l'HV va donc concerner la planification du mouvement, c'est-à-dire la détermination *a priori* des trajectoires et vitesses des effecteurs terminaux permettant de réaliser la tâche considérée. Celle-ci est décomposée en actions élémentaires (par exemple saisir, atteindre, pousser, etc.), caractérisées par un point de départ, un point d'arrivée, une durée et les forces appliquées. Dans le cadre d'une activité de conception, ces données sont les hypothèses de travail du concepteur. Elles peuvent être observées expérimentalement sur un poste de travail similaire ou estimée d'après les caractéristiques du mouvement humain (par exemple, la loi de Fitts (Fitts 1954) relie la durée d'un mouvement à son amplitude et à la dimension de la cible) et la description de la future situation de travail (masse des outils, géométrie du poste, etc.). Pour ce qui est des trajectoires, le contrôleur doit également éviter les collisions avec l'environnement, par exemple pour empêcher que les mains heurtent le plan de travail pendant la réalisation de la tâche. Ce problème, abondamment abordé dans la littérature, nécessite l'intégration d'un algorithme de planification de trajectoire (path-planning) aux lois de commande. Ce problème n'a pas été abordé dans cette étude : par simplification, un point de passage d'évitement est imposé arbitrairement à la trajectoire selon les besoins.

Le planificateur de trajectoire développé (De Magistris et al. 2013) a été basé sur la méthode du *minimum jerk*, d'après les travaux de Todorov (Todorov & Jordan 1998). Pour mémoire, le *jerk* désigne la dérivée de l'accélération par rapport au temps, c'est-à-dire la dérivée troisième de la position par rapport au temps. Le planificateur *minimum jerk* cherche donc à limiter les accélérations du mouvement. Il est compatible avec la loi de la puissance $2/3$ (cf. équation 1).

$$\dot{s}(t) = Z_s \cdot R^{1-\frac{2}{3}}, \quad \omega(t) = Z_s \cdot C(t)^{\frac{2}{3}} \quad (1)$$

Cette loi, caractéristique du mouvement humain, relie le rayon de courbure R / la courbure C à la vitesse curviligne \dot{s} / de rotation ω , Z_s étant une constante appelée *facteur de gain de vitesse*.

Notre contrôleur applique la minimisation du *jerk* à la fois en translation (dérivée troisième de la position) et en rotation (dérivée troisième de l'orientation) de l'effecteur terminal considéré.

Le calcul de la trajectoire minimisant le *jerk* nécessite donc la durée, ainsi que les positions, vitesses et les accélérations initiales et finales du mouvement. Les positions initiale et finale dépendent de la géométrie du poste de travail. En simulation, les vitesses et accélérations initiales et finales peuvent être choisies

nulles (les états initial et final sont supposés des états de repos).

3.2.2 Contrôle multi-objectifs

Une fois le mouvement des effecteurs terminaux planifié, celui-ci doit être suivi au plus près par l'HV, tout en s'adaptant aux contraintes physiques liées à l'environnement et à la réalisation de la tâche. Les équations de la mécanique sont formulées et traitées selon une approche robotique :

$$M\dot{T} + NT + G = L\tau + \sum_j J_{c_j}^T W_{c_j} + \sum_k J_{e_k}^T W_{eff_k} \quad (2)$$

où M est la matrice d'inertie généralisée, N est associé aux forces centrifuges et de Coriolis, \dot{T} et $T = [V_{root} \dot{q}_1 \dots \dot{q}_{ndof}]^t$ sont les vecteurs accélération et vitesse en coordonnées généralisées, G est la force de gravité, $\tau = [\tau_1 \dots \tau_{ndof}]^t$ le vecteur des couples articulaires, $L = [0_{(ndof,6)} I_{ndof}]^t$ la matrice de sélection des articulations à contrôler, W le torseur des efforts (cf. figure 2) et J la jacobienne du corps considéré. L'indice c correspond aux points de contact non glissant connus (pied au sol par exemple), l'indice e aux points de contacts avec l'environnement. L'équation 2 est linéarisée et résolue à un pas de temps faible (de l'ordre de 0.01 seconde). Chaque action est décomposée en sous-tâches élémentaires (gérer l'équilibre, piloter la tête, piloter une main, maintenir les points de contacts). Deux optimisations multicritères successives sont alors appliquées (*Quadratic Programming, QP*), la première basée sur le modèle d'anticipation et la seconde sur le modèle en rétro-action (De Magistris 2014). Chaque optimisation repose sur une pondération des différentes consignes appliquées au systèmes à travers les termes N , G , W_c et W_{eff} . Le poids principal est donné à la tâche de maintien de l'équilibre du mannequin. Ce problème est simplifié en cherchant à résoudre, d'une part, l'équilibre statique du mannequin rapporté à son centre de masse et, d'autre part, des contacts non glissants et des efforts d'appui bornés.

3.2.3 Apprentissage de la force

On souhaite que le contrôleur développé puisse déterminer l'effort minimal exercé par le système pour la bonne réalisation de la tâche, tout comme l'humain cherche à optimiser le coût métabolique lié à son activité (Burdet et al. 2001). Le contrôleur doit également pouvoir prendre en compte une situation instable (survenue d'une perturbation lors de la réalisation de la tâche). Une solution simple pour cela serait d'augmenter l'impédance du système pour se prémunir contre un niveau prévisible de perturbation. Toutefois, cela entraîne un surcoût énergétique sans garantir la réussite de la tâche (si une perturbation supérieure à celle prévue survient). Un algo-

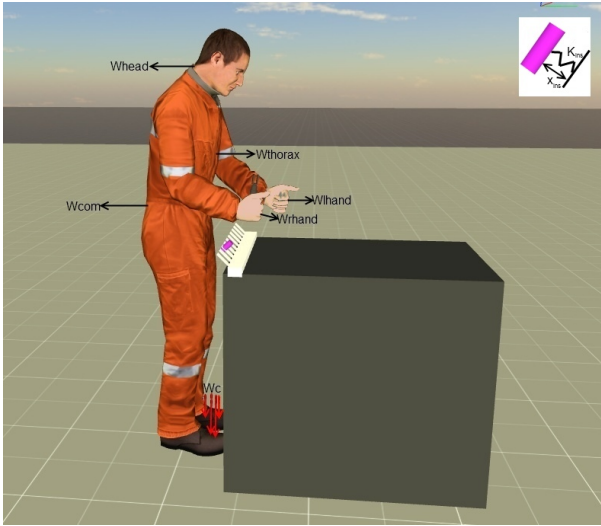


Figure 2: L'humain virtuel et les torseurs W à contrôler : com (centre de masse) pour la gestion de l'équilibre ; la tête qui suit le mouvement de l'effecteur terminal (EE) ; le thorax évitant les mouvements amples ; c (contacts non glissants) ; lhand (main gauche) et rhand (main droite) les effecteurs terminaux pour la réalisation de la tâche. L'insert virtuel est modélisé en haut à droite.

rythme adaptatif doit donc être envisagé. Pour notre contrôleur, un algorithme par apprentissage itératif de type *repetitive control* a été choisi : à chaque pas de temps, le contrôleur optimise par itérations successives l'impédance (raideurs et amortissements articulaires) et les couples articulaires anticipés, en fonction des erreurs de trajectoire ϵ et de vitesse δ (De Magistris et al. 2014). Conformément aux travaux de Ganesh (Ganesh et al. 2010), un facteur d'oubli γ est introduit pour éviter les instabilités. Comme dans les travaux Yang (Yang et al. 2011), le facteur d'oubli est choisi dépendant de l'erreur en position ϵ :

$$\gamma = \frac{p}{1 + u \cdot \|\epsilon\|^2} \quad (3)$$

où p et u sont choisis arbitrairement. Ainsi, quand ϵ est grand, γ est petit : lorsque l'erreur de suivi est faible, l'apprentissage est plus rapide.

3.2.4 Synthèse

Le schéma suivant 3 présente le principe général du contrôleur. Les données d'entrée sont la description des actions élémentaires de la tâche à réaliser (points de départ et d'arrivée, durée, force exercée), fournie par le concepteur. Le contrôleur calcule la trajectoire "minjerk" des effecteurs puis optimise en anticipation et rétro-action le mouvement global de l'HV. L'apprentissage itératif permet d'adapter les paramètres d'optimisation pour minimiser les efforts

mis en œuvre.

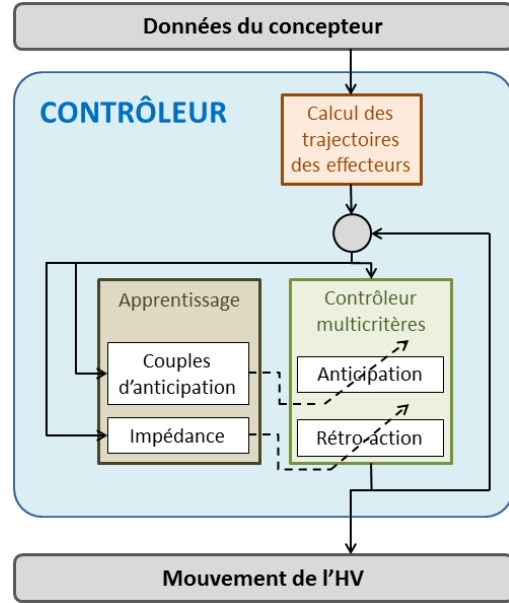


Figure 3: Schéma de principe du contrôleur.

4 VALIDATION DES MODÈLES ET LOIS DE COMMANDE DÉVELOPPÉS

4.1 Tâche expérimentale de validation

Afin de valider les simulations obtenues par l'HV et les lois de commande développées, les données issues d'une campagne expérimentale conduite à l'INRS ont été exploitées. Ces données portaient sur une tâche de pose d'inserts. Cette activité, répétitive et réalisée à cadence rapide imposée, est représentative des tâches industrielles d'assemblage présentes dans les secteurs de l'automobile et de l'électroménager. Elle peut présenter, à long terme, des risques de survenue de troubles musculo-squelettiques (TMS) des membres supérieurs. Les enregistrements réalisés lors de cette expérimentation ont concerné des données de mouvements (capture optique des trajectoires de marqueurs placés sur le corps), d'efforts externes (capteurs de forces et couples pendant la mise en place des inserts) et d'activité musculaire des membres supérieurs et du haut du dos. Des simulations ont été réalisées avec l'HV et leurs résultats ont été comparés aux observations expérimentales. Onze sujets (neuf hommes et deux femmes) droitiers, sains et volontaires ont participé à l'expérimentation (âge = 29, 4 ± 9, 2 ans, taille = 177, 7 ± 10, 3 cm, poids = 75, 9 ± 9, 3 kg). Ils avaient déjà effectué des tâches d'assemblage fin au cours de leur vie professionnelle. Ces sujets ont reçu pour consigne de mettre en place, selon différentes modalités (à main nue ou à l'aide d'un outil), des séries de dix inserts sur les supports positionnés sur une plateforme de force placée devant eux en suivant la cadence d'un métronome et sans interruption (cf. figure 5). Avant

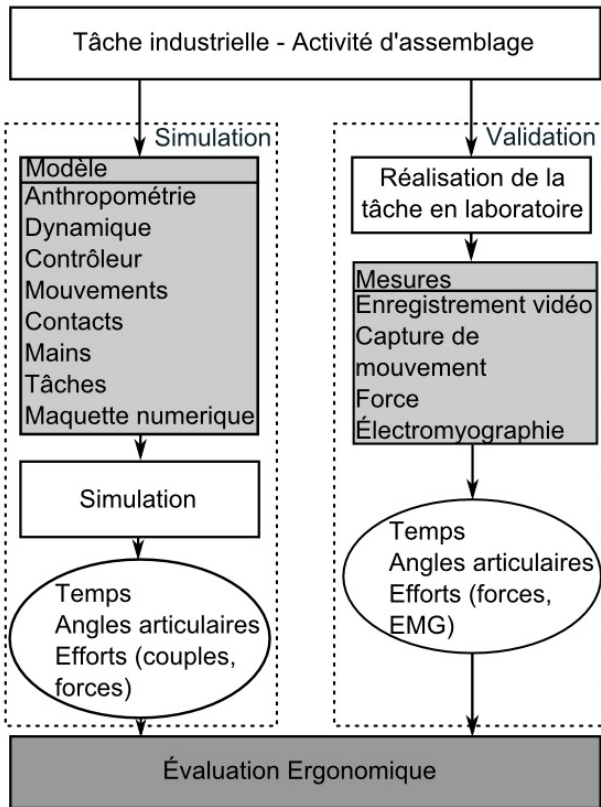


Figure 4: Démarche de validation du contrôleur d'humain virtuel.

de débuter l'enregistrement des données, chaque sujet s'est entraîné jusqu'à ce qu'il se sente à l'aise. Les onze sujets ont réalisé la tâche selon les deux modalités.



Figure 5: Expérimentations de pose d'inserts en laboratoire.

4.2 Paramétrisation des lois de commande

Les consignes appliquées à l'HV pour l'optimisation multi-objectif sont les suivantes :

- Centre de masse (CdM). Le contrôleur dynamique maintient l'équilibre de l'HV en imposant que la projection horizontale du centre de masse reste dans une zone de support convexe (Bretl & Lall 2008) ;
- Effecteurs terminaux. Cette consigne correspond au suivi des trajectoires et vitesses de la main / des deux mains, telles que déterminées lors de la phase de planification du mouvement ;
- Contacts au sol. On impose que les pieds restent en contact non glissant avec le support, les sujets restant en appui sur leurs deux pieds pendant la tâche ;
- Tête. Cette consigne cherche à restituer un comportement observé expérimentalement : le regard du sujet suit la main effectuant l'action principale (saisie, atteinte, appui).

Un poids est associé à chaque consigne. Il est fixé une fois pour toutes les simulations (cf. tableau 1).

Objectif	Pondération
CdM	10^4
Main droite	$2 \cdot 10^3$
Main gauche	$2 \cdot 10^3$
Contacts entre les pieds et le sol	10^0
Tête	10^2

Tableau 1: Pondérations des différents objectifs d'optimisation.

4.3 Résultats

4.3.1 Évaluation ergonomique

Un premier niveau de validation de l'HV développé a concerné la conformité de l'évaluation ergonomique des activités réelles et simulées. L'indicateur OCRA a été utilisé car c'est l'outil d'évaluation recommandé par la norme de référence en conception de situation de travail (CEN 2007). Il établit un indice I dont la valeur mesure le niveau de risque de survenue de TMS. Selon la valeur de I , l'activité est considérée comme *acceptable* ($I < 2,2$), *acceptable sous condition* ($2,2 < I < 3,5$) ou *inacceptable* ($I > 3,5$). Le tableau 2 présente les indices OCRA des différentes simulations calculées ainsi que de l'activité expérimentale des sujets pour différentes modalités (sans outil avec une ou deux mains, avec outil). On constate que les indices des simulations et de l'activité réelle sont très proches et cohérents en termes de classe de risque.

Modalité	Activité réelle		Simulation	
	Main gauche	Main droite	Main gauche	Main droite
Une main $n = 4$		7.3 ± 3.7 NA		7.2 ± 3.4 NA
Deux mains $n = 4$	1.2 ± 0.3 A	7.5 ± 2.6 NA	1.2 ± 0.3 A	6.9 ± 2.8 NA
Avec outil $n = 11$	2.5 ± 0.6 AC	3.3 ± 0.7 AC	2.4 ± 0.6 AC	3.2 ± 0.6 AC

Tableau 2: Comparaison de l'activité réelle et simulée : moyenne des indices OCRA pour les membres supérieurs, et niveaux de risque correspondant. Notation : moyenne \pm écart-type (niveau de risque). A, AC et NA signifient "acceptable", "acceptable sous condition", "non acceptable", n le nombre de sujets ayant réalisé la tâche selon cette modalité.

4.3.2 Trajectoires, vitesses et efforts

La correspondance des évaluations ergonomiques des activités réelle et simulée étant vérifiée, le niveau de réalisme des simulations a été étudié, en particulier l'écart entre les profils des trajectoires / vitesses simulées et les profils des trajectoires / vitesses réelles pour le mouvement d'atteinte de la modalité d'insertion à une main (cf. figures 6 et 7). Pour quatre sujets, la trajectoire simulée d'une insertion a été comparée avec les trajectoires réelles suivies pour les six inserts médians (les deux inserts initiaux et terminaux sont exclus). Cette comparaison a nécessité l'application de transformations affines afin de mettre en correspondance les points de départ et d'arrivée des trajectoires réelles et simulées.

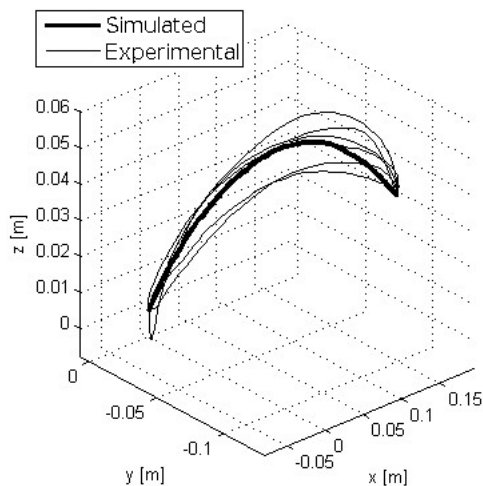


Figure 6: Trajectoires du poignet droit pour le premier sujet.

La similitude entre le profil de la trajectoire simulée et les profils des trajectoires réelles est mesurée à l'aide de deux indicateurs : la distance de Hausdorff et la

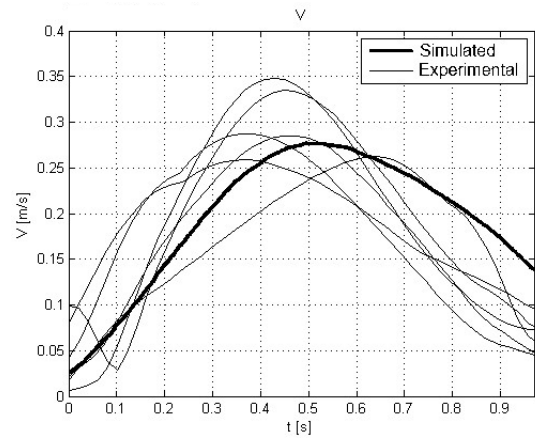


Figure 7: Vitesses du poignet droit pour le premier sujet.

distance moyenne (cf. tableau 3). On constate que les

Sujet	Dist. de Hausdorff	Dist. moyenne
1	(2.0 ± 0.7) cm	(1.0 ± 0.3) cm
2	(1.5 ± 0.4) cm	(0.7 ± 0.2) cm
3	(1.7 ± 0.5) cm	(0.9 ± 0.3) cm
4	(2.6 ± 1.2) cm	(1.5 ± 0.6) cm

Tableau 3: Distance entre le profil de la trajectoire simulée et les profils des trajectoires réelles.

trajectoires et vitesses simulées restent très proches de l'enveloppe des trajectoires et vitesses réelles. En outre, on constate que les couples articulaires générés par notre HV sont compatibles avec les performances humaines. Par exemple, les valeurs maximales du couple de flexion du coude droit obtenues en simulation sont d'environ $22 \text{ N} \cdot \text{m}$, et de $5 \text{ N} \cdot \text{m}$ pour le poignet (cf. figure 8). Ces valeurs sont cohérentes au vu de la tâche réalisée, et nettement inférieures aux couples maximaux admissibles correspondants (au niveau du coude, le couple maximal est d'environ $70 \text{ N} \cdot \text{m}$ pour les hommes et $35 \text{ N} \cdot \text{m}$ pour les femmes (Askew et al. 1981) ; au niveau du poignet, le couple maximal est de $8.05 \text{ N} \cdot \text{m}$ en flexion et de $6.53 \text{ N} \cdot \text{m}$ en extension (Ciriello et al. 2001)).

5 DISCUSSION

Les évaluations ergonomiques des simulations faites avec ce contrôleur d'HV sont cohérentes avec l'évaluation de l'activité des sujets humains. On a également pu valider la concordance de profils de trajectoire et de vitesses de la main pour un mouvement d'atteinte. Pour le type de tâches considéré, la robustesse du contrôleur s'avère satisfaisante : si l'on change les caractéristiques de la tâche ou de l'opérateur (par exemple si l'on modifie la position et l'orientation des supports d'insert et/ou

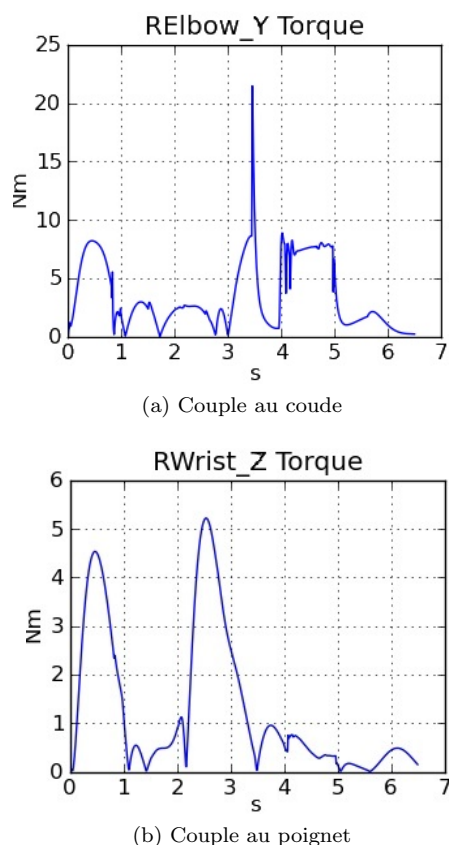


Figure 8: Couples simulés au coude et au poignet droits.

l'anthropométrie de l'opérateur) sans rien changer aux paramètres du contrôleur, la simulation reste stable, fluide et réaliste (cf. figure 9). Il conviendra de confirmer les performances et la généricité des algorithmes et paramètres associés pour des tâches plus variées / complexes.

Le temps de calcul des simulations est acceptable. Une station de travail (PC équipé d'un processeur Intel Xeon E5630 - RAM 24 Go) permet de calculer une simulation en temps quasi réel : le temps de calcul est de l'ordre de 1,5 fois la durée de l'activité simulée, ce qui est tout à fait acceptable pour une application d'aide à la conception.

6 CONCLUSION

Les HV sont des outils pouvant contribuer à l'application des principes de sécurité dès les premières phases de conception d'une situation de travail, mais l'animation réaliste et fiable pour faire l'évaluation ergonomique d'une activité future est complexe. Le contrôleur dynamique d'HV présenté dans cet article intègre différentes lois de commandes modélisant le comportement humain, en particulier les capacités d'anticipation, de rétroaction et d'apprentissage du contrôle moteur humain.

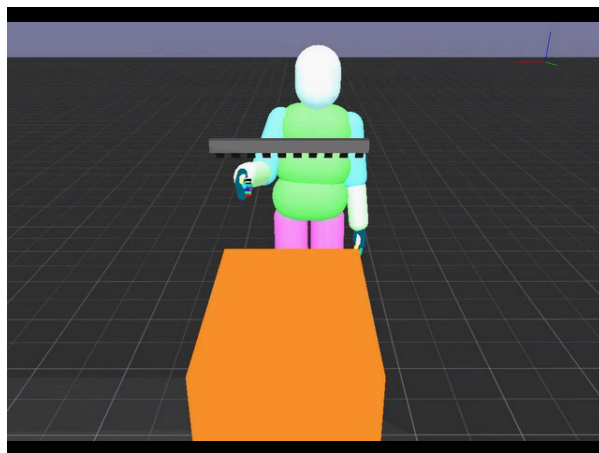


Figure 9: Modification de la tâche simulée : insertion en hauteur.

Ces travaux ouvrent des perspectives innovantes, notamment pour la prise en compte de la variabilité des mouvements de l'opérateur. En effet, tous les mouvements humains présentent une variabilité, y compris les mouvements professionnels (Matthiassen et al. 2003). Celle-ci interviendrait dans les processus de contrôle et de régulation du mouvement (Diniz et al. 2011), permettant d'en maintenir la stabilité mais aussi de le doter de capacités d'adaptabilité et de flexibilité essentielles pour répondre aux contraintes extérieures (Glazier et al. 2006). Elle pourrait avoir un effet préventif sur la survenue de la fatigue (Farina et al. 2008, Van Dieën et al. 2009, Bosch 2011) ou d'atteintes de l'appareil locomoteur tels que les TMS (Kilbom 1994, Mathiassen 2006, Madeleine et al. 2008). Or, à l'heure actuelle, les HV ne permettent que l'étude d'une posture, au mieux d'une trajectoire, sans prendre en compte la variabilité associée. Les travaux décrits dans cet article pourraient être enrichis afin de simuler l'activité future, mais également d'en explorer les fluctuations possibles pour retenir celles qui seraient bénéfiques à la santé des travailleurs.

REFERENCES

References

- Andreoni, G., Mazzola, M. & Orso, E. (2011). Ergonomic assessment of reaching tasks: a comparison between real and virtual human, *First International Symposium on Digital Human Modeling*, Lyon, France.
- Arndt, F. W. (2006). The digital factory planning and simulation of production in automotive industry, *Informatics in Control, Automation and Robotics I* pp. 27–29.
- Askew, L. J., An, K. N., Morrey, B. F. & Chao, E. Y. (1981). Functional evaluation of the elbow. *nor-*

mal motion requirements and strength determinations, *Orthop. Trans.* pp. 5–304.

- Berthoz, A. (1997). *Le sens du mouvement*, Edition Odile Jacob.
- Bizzi, E. & Mussa-Ivaldi, F. (1998). Neural basis of motor and its cognitive implications, *Trends in Cognitive Sciences* **2**: 97–102.
- Bosch, T. (2011). *Fatigue and performance in repetitive industrial work*, University Amsterdam. ISBN 978-90-6464-471-9.
- Bretl, T. & Lall, S. (2008). Testing static equilibrium for legged robots, *IEEE Transactions on Robotics* **24**: 794–807.
- Burdet, E., Osu, R., Franklin, D., Milner, T. & Kawato, M. (2001). The central nervous system stabilizes unstable dynamics by learning optimal impedance, *Nature* **414**: 446–449.
- CEN (2005). En 1005-4 safety of machinery - human physical performance -part 4: Evaluation of working postures and movements in relation to machinery”.
- CEN (2007). En 1005-5 safety of machinery - human physical performance - part 5: Risk assessment for repetitive handling at high frequency”.
- Ciriello, V. M., Snook, S. H., Webster, B. S. & Dempsey, P. (2001). Psychophysical study of six hand movements, *Ergonomics* **44**: 922–936.
- Claudon, L., Daille-Lefevre, B. & Marsot, J. (2008). La révolution du numérique : un atout pour concevoir des postes de travail plus sûrs, *Hygiène et Sécurité du Travail* **210**(2282): 5–13.
- Colette, C. (2009). *Commande dynamique d’humains virtuels : équilibre robuste et gestion de tâches*, PhD thesis, Université Pierre et Marie Curie.
- Conditt, M., Gandolfo, F. & Mussa-Ivaldi, F. (1997). The motor system does not learn the dynamics of the arm by rote memorisation of past experience, *Journal of Neurophysiology* **78**: 554–560.
- Diniz, A., Wijnants, M. I., Torre, K., Barreiros, J., Crato, N., Bosman, A. M., Hasselman, F., Cox, R. F., Orden, G. C. V. & Delignières, D. (2011). Contemporary theories of 1/f noise in motor control, *Human Movement Science* **30**: 889–905.
- De Magistris, G. (2014). Etude et conception de la commande de mannequins virtuels dynamiques pour l’évaluation ergonomique des postes de travail, *Note Scientifique et Technique de l’INRS NS* **321**: 1–171.
- De Magistris, G., Micaelli, A., Evrard, P., Andriot, C., Savin, J., Gaudez, C. & Marsot, J. (2013). Dynamic control of dhm for ergonomic assessments, *International Journal of Industrial Ergonomics* **43**: 170–180.
- De Magistris, G., Micaelli, A., Evrard, P. & Savin, J. (2014). A human-like learning control for digital human models in a physics-based virtual environment, *The Visual Computer* pp. 1–18.
- European Parliament and Council (2006). Directive 2006/42/ec of the european parliament and of the council of 17 may 2006 on machinery, june 9th 2006, <http://eur-lex.europa.eu/LexUriServ/LexUriServ.do?uri=OJ:L:2006:157:0024:0086:EN:PDF>.
- Falck, A. & Rosenqvist, M. (2012). What are the obstacles and needs of proactive ergonomics measures at early product development stages? - an interview study in five swedish companies, *International Journal of Industrial Ergonomics* **42**(5): 406–415.
- Farina, D., Leclerc, F., Arendt-Nielsen, L., Buttelli, O. & Madeleine, P. (2008). The change in spatial distribution of upper trapezius muscle activity is correlated to contraction duration, *Journal of Electromyography and Kinesiology* **18**: 16– 25.
- Fitts, P. (1954). The information capacity of the human motor system in controlling the amplitude of movement, *Journal of Experimental Psychology* **47**: 381–391.
- Fritzsche, L., Jendrusch, R., Leidholdt, W., Bauer, S., T. T. J. & Pirger, A. (2011). Introducing ema (editor for manual work activities), a new tool for enhancing accuracy and efficiency of human simulations, *Digital Human Modeling, Lecture Notes in Computer Science*, Vol. 6777, V.G. Duffy Ed, pp. 272–281.
- Ganesh, G., Albu-Schaeffer, A., Haruno, M., Kawato, M. & Burdet, E. (2010). Biomimetic motor behavior or simultaneous adaptation of force, impedance and trajectory in interaction tasks, *IEEE International Conference on Robotics and Automation*, Anchorage, Alaska, USA.
- Glazier, P. S., Wheat, J. S., Pease, D. L. & Bartlett, R. (2006). Dynamic system theory and the functional role of movement variability, *Movement System Variability*, (Davids K, Bennett S, Newell K ed), Human Kinetics Publishers, Champaign (IL), pp. 49–72.
- Gribble, P. & Ostry, D. (2000). Compensation for loads during arm movement using equilibrium-point control, *Experimental Brain Research* **135**: 474–482.

- Haesen, B. (2009). Betterlift - introducing a semi-automatic exhaust manipulator to reduce a high absenteeism rate, *Int Assessment, elimination and substantial reduction of occupational risks - European Agency for Safety and Health at Work (Eu-OSHA)* pp. 36–43.
- Hanavan, E. P. (1964). A mathematical model of the human body, *Wright-Patterson Air Force Base Report No. AMRL-TR-102*: 64–102.
- Hugon, M., Massion, J. & Wiesendanger, M. (1982). Anticipatory postural changes induced by active unloading and comparison with passive unloading in man, *Pflügers Archiv* **393**(4): 292–296.
- Imamizu, H., Miyauchi, S., Tamada, T., Sasaki, Y., Takino, R., Putz, B., Yoshioka, T. & Kawato, M. (2000). Human cerebellar activity reflecting an acquired internal model of a new tool, *Nature* **403**(6766): 192–195.
- Kawato, M. (1999). Internal models for motor control and trajectory planning, *Current Opinion in Neurobiology* **9**(6): 718–727.
- Kilbom, A. (1994). Repetitive work of the upper extremity part ii: the scientific basis (knowledge base) for the guide, *International Journal of Industrial Ergonomics* **14**: 59–86.
- Lämkull, D., Hanson, L. & Ortengren, R. (2009). A comparative study of digital human modelling simulation results and their outcomes in reality: A case study within manual assembly of automobiles, *International Journal of Industrial Ergonomics* **39**: 428–441.
- MacAtamney, L. & Cortlett, E. N. (1993). Rula: a survey method for the investigation of work-related upper limb disorders, *Applied Ergonomics* **24**: 91–99.
- Madeleine, P., Mathiassen, S. E. & Arendt-Nielsen, L. (2008). Changes in the degree of motor variability associated with experimental and chronic neck-shoulder pain during a standardized repetitive arm movement, *Experimental Brain Research* **185**: 689–698.
- Mansour, D. (2013). *Balance control of virtual manikins in perturbed environments*, PhD thesis, Université Pierre et Marie Curie.
- Mathiassen, S. E. (2006). Diversity and variation in biomechanical exposure: what is it, and why would we like to know?, *Applied Ergonomics* **37**: 419–427.
- Matthiassen, S. E., Möller, P. T. & Forsman, M. (2003). Variability in mechanical exposure within and between individuals performing a highly constrained industrial work task, *Ergonomics* **46**: 800–824.
- Maynard, H. B., Stegemerten, G. J. & Schwab, J. L. (1948). Methods-time measurement, *McGraw Hill book company*.
- Merlhiot, X. (2009). Extension of a time-stepping compatible contact determination method between rigid bodies to deformable models, *Proceedings of the Multibody Dynamics ECCOMAS Thematic Conference*.
- Occhipinti, E. (1998). Ocra, a concise index for the assessment of exposure to repetitive movements of the upper limbs, *Ergonomics* **41**: 1290–1311.
- Salini, J. (2012). *Commande dynamique pour la coordination tâche/posture des humanoïdes : vers la synthèse d'activités complexes*, PhD thesis, Université Pierre et Marie Curie.
- Savin, J. (2011). Digital human manikins for work-task ergonomic assessment: which degree of confidence and using constraints?, *Proceedings of the Institution of Mechanical Engineers, Part B: Journal of Engineering Manufacture* **225**: 1401–1409.
- Schaub, K., Caragnano, G., Britzke, B. & Bruder, R. (2013). The european assembly worksheet, *Theoretical Issues in Ergonomics Science* **14**: 616–639.
- Todorov, E. & Jordan, M. (1998). Smoothness maximization along a predefined path accurately predicts the speed profiles of complex arm movements, *Journal of Neurophysiology* **80**: 697–714.
- Urbatic Concept (2007). Une approche innovante de l'ergonomie, *Ergonoma Journal* **48**: 22–23.
- Van Dieën, J. H., Westebring-Van Der Putten, E. P., Kingma, I. & De Looze, M. P. (2009). Low-level activity of the trunk extensor muscles causes electromyographic manifestations of fatigue in absence of decreased oxygenation, *Journal of Electromyography and Kinesiology* **19**: 398–406.
- Yang, C., Ganesh, G., Haddadin, S., Parusel, S., Albu-Schaeffer, A. & Burdet, E. (2011). Human like adaptation of force and impedance in stable and unstable interactions, *Transactions on Robotics* **27**: 918–930.
- Zülch, G. (2012). Features and limitations of digital human models - a new german guideline, *Work: A Journal of Prevention, Assessment and Rehabilitation* **41**: 2253–2259.